

Dipl.-Math. oec. Klaus-Dieter Hilf, Stuttgart

Optimale Versuchsplanung zur dynamischen Roboterkalibrierung

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Nr. **590**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Bedeutung der Roboterkalibrierung	1
1.2	Aufgabenstellung der Versuchsplanung	5
1.3	Ziel der Arbeit	6
1.4	Inhalt der Arbeit	7
2	Modellierung von mechanischen Systemen	10
2.1	Modellierungsansatz	10
2.2	Physikalische Grundlagen	13
2.3	Dynamik von Systemen starrer Körper	16
2.4	Modellierung als Mehrkörpersysteme	20
2.5	Integration von mechanischen DAE	25
3	Parameterschätzung und Versuchsplanung	27
3.1	Parameterschätzung	27
3.2	Optimale Versuchsplanung	39
3.3	Berechnung von optimalen Versuchsplänen	48
4	Stand der Forschung in der Kalibrierung	50
4.1	Kinematische Kalibrierung	50
4.2	Dynamische Kalibrierung	52
5	Optimierungsprobleme der Versuchsplanung	59
5.1	Problemstellung	59
5.2	Kontinuierliche Formulierung	60
5.3	Diskretisierte Formulierung	68
5.4	Benutztes Optimierungsverfahren	74
5.5	Ableitung nach Steuerungen	78
5.6	Ableitung nach den Wichtungen	82
5.7	Ableitung nach Meßzeitpunkten	85
5.8	Ableitung nach Meßvariablen	87
5.9	Ableitung nach Anfangswerten	88

6	Sensitivitätsanalyse bei ODE und DAE	90
6.1	Sensitivitätsanalyse für Parameter	90
6.2	Sensitivität zweiter Ordnung für Steuerungen	98
6.3	Sensitivitätsanalyse für Steuerungen	101
6.4	Sensitivität zweiter Ordnung für Anfangswerte	103
6.5	Anwendung der Kettenregel	104
7	Sensitivitätsanalyse in Mehrkörpersystemen	110
7.1	Einleitung	110
7.2	Sensitivitätsanalyse der ersten Ordnung	111
7.3	Sensitivitätsanalyse der zweiten Ordnung	114
7.4	Realisierung der Ableitungsberechnung	119
8	Invarianten der Variations-DAE	122
8.1	Einführung in die Problemstellung	122
8.2	Invarianten für die Sensitivitätsmatrizen	123
8.3	Numerische Realisierung der Stabilisierung	130
9	Schätzung von Inertialparametern	132
9.1	Problemstellung	132
9.2	Schätzbarkeit von Inertialparametern	135
9.3	Anwendung auf dynamische Schätzungen	142
9.4	Numerische Realisierung	146
10	Numerische Ergebnisse	147
10.1	Definition des Versuchsplanungsproblems	147
10.2	Besonderheiten der Implementierung	149
10.3	Ein Scara-Roboter	151
11	Zusammenfassung und Ausblick	194
11.1	Beurteilung des Verfahrens	194
11.2	Ausblick	195
A	Grundlagen	197
A.1	Grundlagen der physikalischen Herleitung	197
A.2	Lineare Abhängigkeit bei Matrixprodukten	198
A.3	Statistische Grundlagen	199
A.4	Bildung von Ableitungen	202
B	Robotermodell	204